

种子引发对干旱胁迫下高粱种子发芽及生理特性的影响

张瑞栋 梁晓红 刘 静 南怀林 王颂宇 曹 雄

(山西农业大学经济作物研究所, 030031, 山西太原)

摘 要 萌发期的干旱胁迫是限制高粱生产的主要障碍因子, 种子引发是提高作物抗逆性的一个重要技术。为了明确不同引发处理对干旱胁迫下高粱萌发及生理特性的影响, 以晋杂 22 和晋早 5564 为研究材料, 分别进行聚乙二醇 (PEG)、KCl、CaCl₂、水杨酸 (SA) 引发和未引发 (NP) 5 个处理, 研究在正常情况和干旱胁迫下种子发芽情况及生理特性变化。结果表明, 干旱胁迫显著降低高粱种子发芽率, 抑制胚芽和胚根伸长。干旱胁迫下 PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发后, 晋杂 22 的萌发率比 NP 处理分别提高了 18.18%、12.72%、35.45% 和 31.82%, 晋早 5564 的萌发率比 NP 处理分别提高了 20.18%、10.76%、26.91% 和 30.04%。干旱胁迫下, 引发处理促进了胚根和胚芽的伸长, CaCl₂ 和 SA 处理在晋杂 22 抗旱效果最佳, 芽长分别比 NP 处理增加了 267.07% 和 271.95%, 根长分别比 NP 处理增加了 231.94% 和 355.56%。CaCl₂ 处理在晋早 5564 效果最好, 芽长和根长分别比 NP 处理增加了 195.96% 和 206.60%。种子引发提高了胚芽内抗氧化酶活性, 减轻了膜脂过氧化对胚芽的损伤; 同时种子引发促进了糖代谢, 提高了脯氨酸含量, 缓解了干旱胁迫对种子萌发的抑制效应。

关键词 高粱; 萌发期; 干旱胁迫; 种子引发; 生理特性

干旱胁迫被认为是全世界最具破坏性的非生物胁迫之一, 是限制农作物生产力提高的巨大障碍^[1]。作物生长的任何阶段都可能受到干旱胁迫的影响, 种子萌发期是作物对干旱最敏感的时期。高粱起源于非洲, 具有高光效和耐贫瘠等特点^[2], 是世界上 5 亿贫困人口的主食^[3-4], 同时也是我国优质白酒的酿造原料。经过长期的自然进化和人工选择, 高粱具有较强的抗逆性, 广泛种植于干旱和半干旱地区^[5]。然而, 高粱在不同生育阶段对干旱的敏感性不同, 萌发期是最敏感的时期^[6]。春季土壤墒情不足时, 高粱常出现发芽率低、出苗时间长和出苗不整齐等现象, 萌发期干旱也是影响高产群体构建和高粱产量提升的重要因素^[7]。因此, 提高萌发期抗旱能力是保证高粱高产和稳产的重要环节。

种子引发 (seed priming) 是由 Heydecker^[8]提出的一项控制种子缓慢吸水 and 后期回干的技术。该技术主要经过种子前处理, 通过调节萌发早期阶段的代谢活动, 进而促进种子萌发, 并且提高萌发稳定率和整齐率的一种技术, 具有经济、方便和高效等特点^[9]。不同类型的引发剂处理, 如水引发、生长调节剂引发、渗透势引发和化学物质引发等, 被广泛用于提高多种作物的耐旱性^[10]。Patane 等^[11]研究发现, 聚乙二醇 6000 (PEG-6000) 胁迫会降

低种子内部水势, 进而影响甜高粱的发芽率和发芽势, 但引发处理可改善渗透胁迫对种子发芽的影响。Bismillah 等^[12]研究发现, 干旱胁迫下 CaCl₂ 引发的玉米种子具有较长的根和较高的产量。Jisha 等^[13]研究发现, 水杨酸 (salicylic acid, SA) 引发可增加种子内部渗透势, 提高萌发期的抗旱能力。郝西等^[14]研究发现, 种子引发可促进种子内部淀粉和蛋白活化, 进而提高作物的抗逆能力。尽管这些技术都可提高萌发期作物的抗逆萌发能力, 但是不同引发剂在不同作物上的引发效果具有较大的差异^[15]。

本研究以晋杂 22 和晋早 5564 为材料, 明确高粱种子在不同引发剂处理后对干旱胁迫的响应, 通过对形态指标和生理指标的研究, 筛选提高高粱抗旱萌发的最佳引发剂, 从渗透调节和抗旱氧化代谢角度, 初步分析引发处理提高高粱耐旱性的可能机理, 为种子引发技术在高粱上的应用提供理论基础和实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以高粱品种晋杂 22 和晋早 5564 为研究材料, 2 个品种均由山西农业大学高粱研究所提供。

作者简介: 张瑞栋, 主要从事高粱栽培育种研究, E-mail: 342185880@qq.com

曹雄为通信作者, 主要从事高粱栽培育种研究, E-mail: cxxp1969@163.com

基金项目: 吕梁市重点研发项目 (2019NYZDYF19); 山西省高等学校科技创新项目 (2021L149); 山西旱作高粱优势特色产业集群续建项目 (HZGL202103); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-06-14.5-B10)

收稿日期: 2022-04-19; 修回日期: 2022-05-05; 网络出版日期: 2022-07-22

1.2 试验设计

试验于 2021 年在山西农业大学经济作物研究所实验室进行。基于课题组前期试验，设置 5 个处理，分别为 PEG（150mmol/L PEG）、KCl（50mmol/L）、CaCl₂（50mmol/L）、SA（0.1mmol/L）引发和未引发（NP），研究了在正常情况和干旱胁迫（PEG 浓度为 15%）下不同处理对种子发芽的影响。选择颗粒饱满、大小均匀的种子，用 0.5% 的 NaClO 消毒 5min，然后用蒸馏水冲洗 5 遍。将消毒过的种子分别进行引发。种子与引发剂进行混合，比例为 1:5（W/V），在 25℃ 的黑暗环境中引发 10h，期间进行 3~4 次轻轻搅拌，使种子与引发剂充分混匀。引发后，将种子风干至其原始含水量（13%，W/W），以未引发的种子用作对照（CK）。将不同处理的种子置于带有双层无菌滤纸的培养皿（直径 15cm）中，加入 10mL 处理液（150mmol/L PEG）。将培养皿进行黑暗培养，温度设定为 25℃±1℃，相对湿度设定为 70%，连续培养 10d。为了保持恒定的处理溶液浓度，每天更新培养皿中的 PEG 溶液。每个处理重复 3 次，每盘放 50 粒种子，试验采用完全随机设计。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 发芽率 以芽长为种子长度的 50% 视为发芽，在处理后的 0、6、12、24 和 48h 调查发芽率。

1.3.2 形态指标 在处理后的第 5 天，测定不同处理的芽长、根长、芽鲜重和根鲜重。

1.3.3 过氧化氢（H₂O₂）、丙二醛（MDA）、可溶性糖、脯氨酸（Pro）含量及抗氧化酶活性 在处理后的第 5 天，用液氮取样，置于 -80℃ 的冰箱保存，用于测定生理指标。分别称取不同处理的高粱芽 0.5g，加入 5mL 的 50mmol/L pH 7.2 磷酸缓冲液，在冰浴环境中研磨成匀浆，转移到 10mL 的离心管中，在 15 000 转/min 下离心 15min，取上清液用于测定 H₂O₂、MDA 含量及酶活性。按照 Gong 等^[16]的方法测定 H₂O₂ 含量；参照李合生^[17]的方法，用蒽酮法测定可溶性糖含量，用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量；参照张宪政^[18]的方法测定 Pro 含量；参照 Zhang 等^[19]的方法测定 SOD、POD 和 CAT 活性。

1.4 数据处理

用 Microsoft Excel 和 SPSS 10.0 处理系统分析数据，采用 LSD 法进行数据间的多重比较，采用 Origin 8.0 进行图形的绘制。

2 结果与分析

2.1 种子引发对萌发率的影响

由图 1 可以看出，干旱胁迫 48h 后，晋杂 22 和晋早 5564 的发芽率分别下降了 12.00% 和 10.80%，

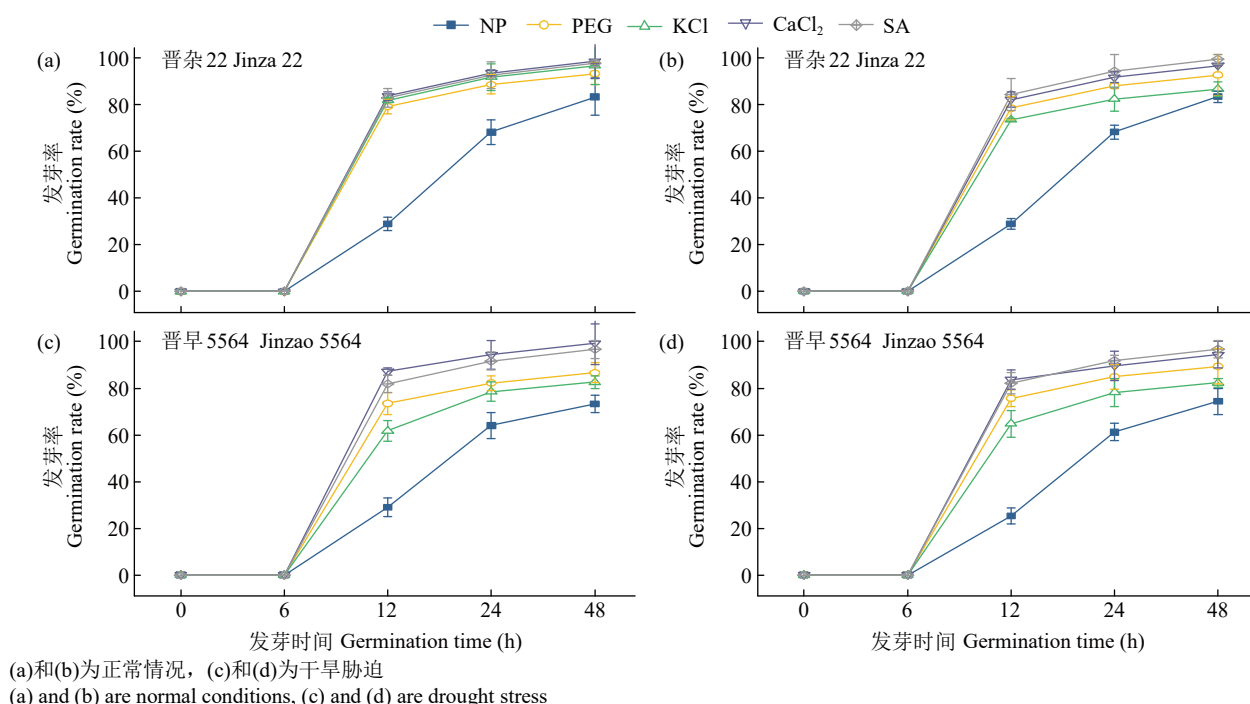


图 1 不同引发剂处理在正常和干旱胁迫下对高粱发芽率的影响

Fig.1 Effects of different priming treatments on the germination rate of sorghum under normal and drought stress conditions

而在正常和干旱胁迫下引发处理均能提高高粱种子的发芽率。干旱胁迫下 PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发后晋杂 22 的发芽率较 NP 处理分别提高了 18.18%、12.72%、35.45%和 31.82%。晋早 5564 的表现与晋杂 22 相似，PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发处理的发芽率分别比 NP 处理提高了 20.18%、10.76%、26.91%和 30.04%。

2.2 种子引发对形态指标的影响

从表 1 可以看出，干旱胁迫严重抑制高粱种子

生长，干旱胁迫下晋杂 22 的芽长、根长、芽鲜重和根鲜重分别比正常降低 69.69%、46.27%、65.89%和 19.33%，晋早 5564 分别比正常降低 58.40%、62.41%、67.15%和 24.97%。种子引发可显著提高种子萌发指标，在干旱胁迫下引发效果更加明显。干旱胁迫下，CaCl₂ 和 SA 引发在晋杂 22 上效果较好，芽长分别比 NP 处理增加 267.07%和 271.95%，根长分别比 NP 处理增加了 231.94%和 355.56%。在晋早 5564 上，CaCl₂ 引发的效果最好，根长和芽

表 1 不同引发处理对高粱苗形态指标的影响

Table 1 The effects of different priming treatments on the germination morphological indicators of sorghum seedlings

品种 Variety	生长环境 Growth condition	处理 Treatment	芽长 Shoot length(cm)	根长 Root length (cm)	芽鲜重 Shoot fresh weight (mg)	根鲜重 Root fresh weight (mg)
晋杂 22 Jinza 22	正常	NP	5.30±0.98b	2.68±0.61d	42.16±4.80c	8.78±4.04c
		PEG	7.66±0.40a	8.94±1.03ab	65.16±3.99b	13.66±1.33bc
		KCl	7.36±0.92a	7.72±1.17b	74.24±10.29a	23.01±3.35ab
		CaCl ₂	8.04±0.27a	5.98±0.47c	76.02±4.78ab	22.29±4.48ab
		SA	7.54±0.54a	10.10±1.27a	68.00±5.84ab	22.60±4.89a
	干旱	NP	1.64±0.24d	1.44±0.30b	14.38±1.27c	7.08±0.29c
		PEG	5.22±0.89b	4.96±0.74a	39.72±1.93a	22.80±1.18b
		KCl	4.32±0.44c	2.76±0.24b	31.86±1.48b	23.96±1.97ab
		CaCl ₂	6.02±0.37a	4.78±0.79a	37.28±2.38a	27.82±4.25a
		SA	6.10±0.44a	6.56±2.15a	41.54±3.33a	25.32±2.08ab
晋早 5564 Jinza 5564	正常	NP	4.76±0.46b	5.64±1.16c	50.14±5.32c	14.61±0.92b
		PEG	6.52±0.71a	9.90±1.97ab	70.66±3.49ab	25.07±6.40a
		KCl	7.32±0.43a	10.76±1.95ab	71.62±8.67ab	26.46±4.22a
		CaCl ₂	7.22±0.56a	8.16±1.02bc	73.23±5.20a	28.00±3.83a
		SA	6.68±0.76a	12.04±2.90a	61.04±2.75bc	24.18±2.91a
	干旱	NP	1.98±0.38d	2.12±0.45b	16.47±1.78c	10.96±2.42b
		PEG	3.20±0.62c	3.98±1.52b	25.28±3.35b	17.66±2.21a
		KCl	4.78±1.31b	7.00±1.74a	34.58±3.85ab	20.17±1.86a
		CaCl ₂	5.86±0.60a	6.50±0.66a	42.88±3.39a	22.75±4.03a
		SA	4.10±0.49bc	7.16±1.68a	38.56±4.12a	21.28±1.80a

同列数据后不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters in each column indicate significant difference ($P < 0.05$)

长分别比 NP 处理增加了 195.96%和 206.60%。

2.3 种子引发对 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响

从图 2 可以看出，干旱胁迫后种子芽的 H₂O₂ 和 MDA 含量显著升高，晋杂 22 芽的 H₂O₂ 和 MDA 含量分别较正常增加了 237.55%和 99.91%，晋早 5564 分别较正常增加了 191.23%和 117.68%。干旱胁迫下种子引发可显著降低种子芽的 H₂O₂ 和 MDA 含量，PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发后，晋杂 22 的种子芽的 H₂O₂ 含量分别下降了 39.74%、31.82%、51.88%、49.33%，MDA 含量分别下降了 35.26%、28.57%、40.92%、43.40%；晋早 5564 也有类似的结果，芽的 H₂O₂ 含量分别下降了 46.41%、36.33%、

53.29%、46.29，MDA 含量分别下降了 36.81%、33.38%、46.08%、44.65%，差异均达到显著水平。

2.4 种子引发对抗氧化酶活性的影响

种子引发可显著提高种子芽的抗氧化酶活性，干旱胁迫下更加明显。干旱胁迫下，PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发处理，晋杂 22 的 SOD 活性分别比 NP 处理提高了 21.75%、25.50%、40.95%和 37.68%（图 3a），POD 活性分别比 NP 处理提高了 20.33%、9.02%、16.53%和 34.43%（图 3c），CAT 活性分别比 NP 处理提高了 29.65%、42.42%、56.40%和 61.46%（图 3e）。种子引发后晋早 5564 的抗氧化酶活性表现出与晋杂 22 类似的变化趋势

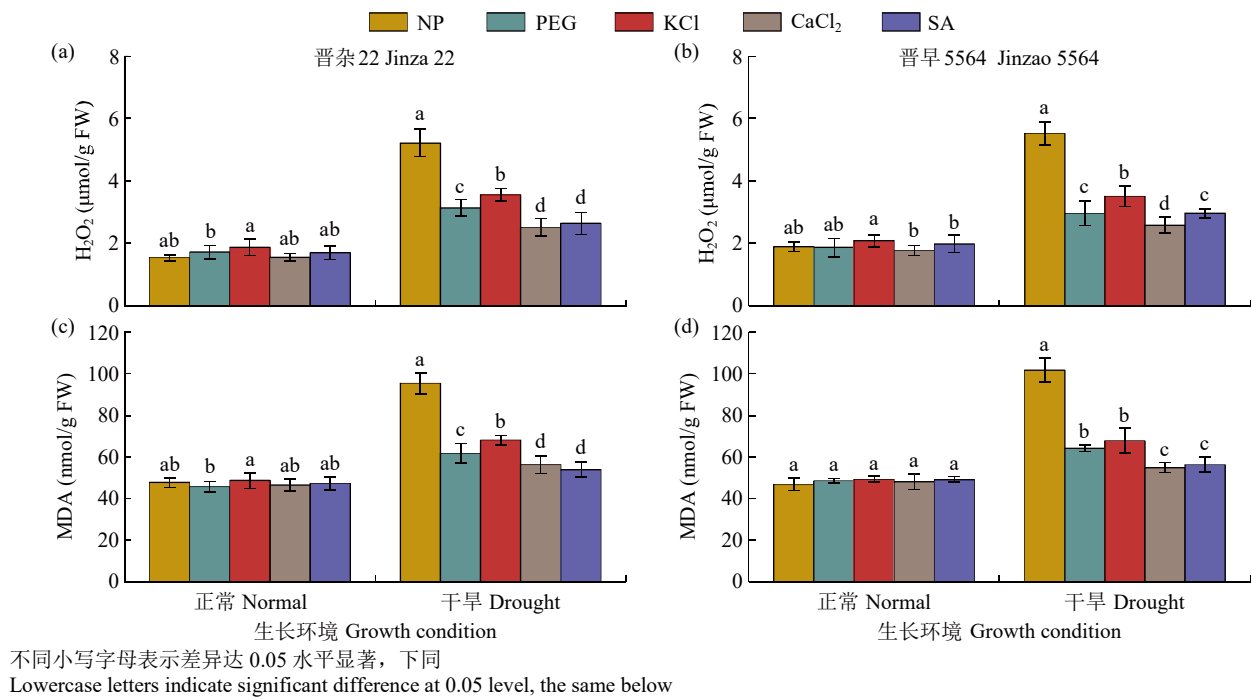
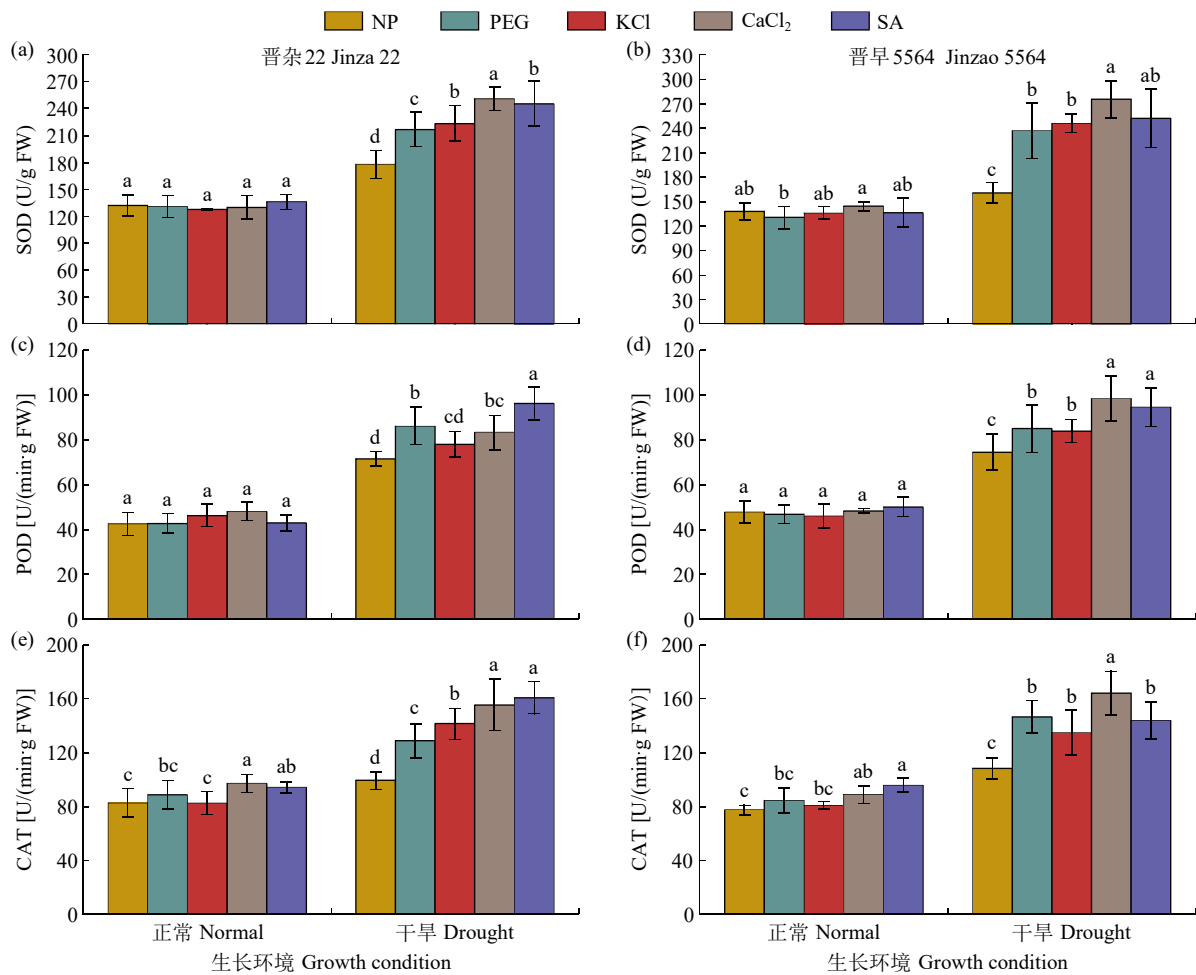
图 2 不同引发处理对高粱芽 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响Fig.2 The effects of different priming treatments on H₂O₂ and MDA contents in sorghum shoots

图 3 不同引发处理对高粱抗氧化酶活性的影响

Fig.3 The effects of different priming treatments on antioxidant enzyme activities in sorghum

(图 3b、d、f)。

2.5 种子引发对可溶性糖和 Pro 含量的影响

干旱胁迫后, 高粱种子芽的可溶性糖含量显著增加, 干旱胁迫下晋杂 22 和晋早 5564 的可溶性糖含量分别比正常情况增加了 48.97% 和 40.49%。种子引发可显著降低胁迫环境下种子芽的可溶性糖含量, 干旱胁迫下 PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发处理, 晋杂 22 的可溶性糖含量与 NP 处理相比分别降

低了 17.69%、15.44%、22.79%、22.69%, 晋早 5564 与 NP 处理相比分别降低 12.04%、16.50%、12.80%、16.58% (图 4a、b)。种子引发显著提高了种子芽的 Pro 含量, 干旱胁迫下, PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发处理, 晋杂 22 的 Pro 含量分别比 NP 处理提高了 15.01%、13.22%、28.77%、28.85%, 晋早 5564 的 Pro 含量分别比 NP 处理提高了 17.84%、16.20%、29.24%、28.46% (图 4c、d)。

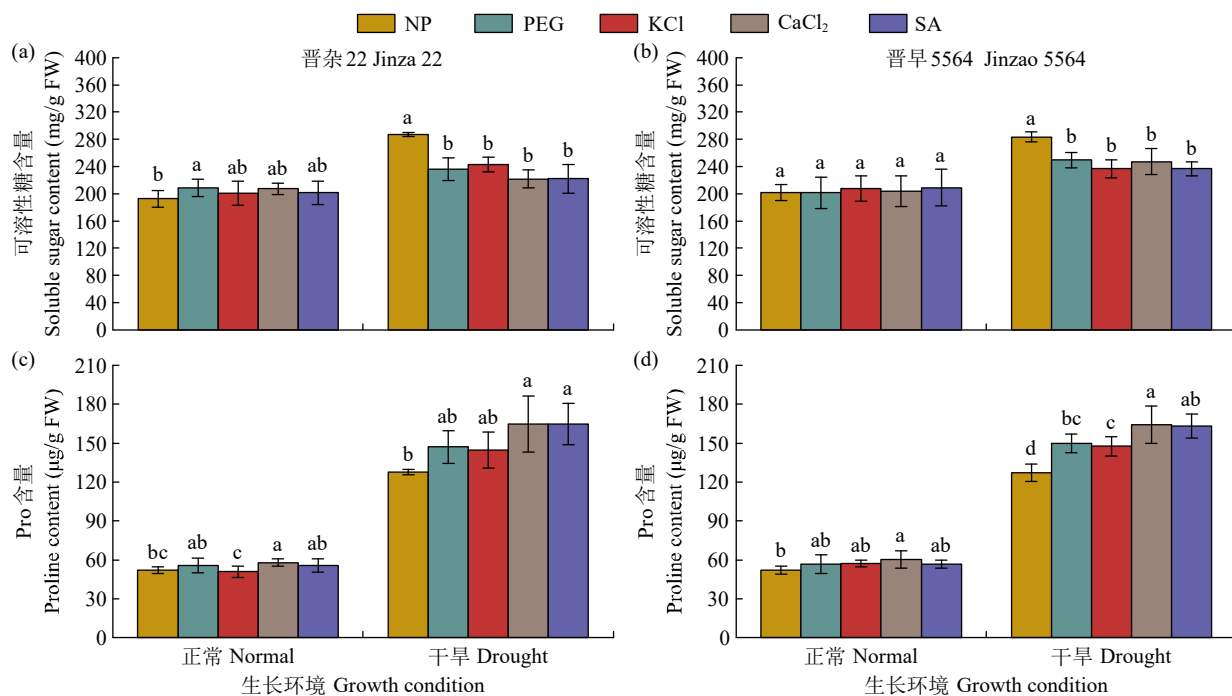


图 4 不同引发处理对高粱可溶性糖和 Pro 含量的影响

Fig.4 The effects of different priming treatments on the soluble sugar and proline contents of sorghum

3 讨论

干旱胁迫是限制作物生产力提高的主要障碍, 预计在未来 1 个世纪内干旱的严重程度和发生频率仍将增加, 提高作物的抗旱能力仍是农业发展的重要课题^[20]。春季干旱造成高粱出苗困难的现象是制约高粱产业发展的一个重要瓶颈。本研究通过 PEG 模拟干旱进行胁迫处理, 为了使研究结果更有普遍性, 选取了山西主栽高粱品种晋杂 22 和最新审定品种晋早 5564 作为试验材料。研究结果显示, 萌发期干旱显著降低了 2 个高粱品种的萌发率, 而且萌发期干旱显著抑制了高粱芽和根的伸长。前人^[10,13,21]研究表明, 种子引发技术在植物应对逆境胁迫中发挥着重要作用, 种子引发可显著提高作物的抗旱、耐盐及耐低温等能力。本研究也发现, PEG、KCl、CaCl₂ 和 SA 引发均可提高 2 个高粱品

种在干旱胁迫下的萌发能力, 从晋杂 22 的发芽率上看, 引发效果为 CaCl₂>SA>PEG>KCl, 在晋早 5564 上, 引发效果为 SA>CaCl₂>PEG>KCl。从萌发的形态指标上看, CaCl₂ 和 SA 引发与其他处理相比, 均能显著提高干旱胁迫下 2 个高粱品种的芽长和根长, 但是这 2 个处理之间许多指标差异不显著。因此, 本研究认为, CaCl₂ 和 SA 引发为较好的处理。

活性氧 (ROS) 是细胞响应逆境重要的调节分子, 而且 ROS 与种子萌发密切相关^[22]。有研究^[23]指出, ROS 可以松弛细胞壁, 活化淀粉层, 为胚根突破种皮提供了必要调节。然而, 在组织中 ROS 积累也可加剧脂质过氧化和膜退化, 并影响植物中生物分子的功能。干旱胁迫会诱导 ROS 的产生, 例如超氧自由基 (·O₂⁻)、羟基自由基 (·OH) 和 H₂O₂。在本研究中, 干旱胁迫造成种子芽的 H₂O₂ 和 MDA

含量显著升高, Bai 等^[24]研究发现, 棉花种子在干旱条件下萌发, 种子体内的 H_2O_2 和 MDA 也会大量积累, 说明干旱胁迫已对高粱种子造成一定的膜脂过氧化损伤, 这也可能是干旱胁迫抑制种子生长的一个重要因素。在本研究中, 种子引发可显著降低干旱胁迫下种子胚芽内 H_2O_2 和 MDA 含量, 而且 $CaCl_2$ 和 SA 引发效果较好, 说明 $CaCl_2$ 和 SA 引发的高粱种子在干旱胁迫下膜脂过氧化程度最低, 这也可能是 $CaCl_2$ 和 SA 引发在干旱胁迫下具有较高发芽率和较好形态指标的重要原因。正常情况下, 植物体内 ROS 的产生与清除处于一个动态平衡的状态, 干旱等逆境胁迫是打破这个平衡的重要因子^[25-26]。为了减轻 ROS 过度积累对膜脂的伤害, 植物体内形成了一套 ROS 的酶清除系统, 其中 SOD、POD 和 CAT 是重要的活性氧清除酶。本研究发现, 引发的种子在干旱胁迫下表现出较强的抗氧化酶活性。Kanto 等^[27]和 Farhoudi 等^[28]发现了类似的现象。这可能是因为种子引发通过前期吸水, 提前完成了种子内部细胞结构的修复和代谢相关酶的活化。同时, 也可能是引发剂的化学调控成分能够激发种子内部的调控网络, 增强抗氧化酶活性。

种子发芽受多种贮藏产物的调节, 可溶性糖为种子发芽提供能量的同时也作为一种渗透调节物质在植物体内起重要作用^[29]。本研究发现, 引发后的种子在干旱胁迫后具有较高的可溶性糖含量, 可溶性糖含量增加有助于降低高粱胚芽组织内的渗透势, 提高其在高渗透环境下的耐受力。Khan 等^[30]研究表明, 种子引发可提高种子胚乳内 α 淀粉酶活性, 促使淀粉水解, 增加糖的供应。本研究发现, 种子引发后可溶性糖含量下降, 这可能是种子引发促进了糖的代谢, 为种子的抗旱萌发提供了能量。但是, 种子引发如何调节糖代谢以及能量代谢还有待进一步研究。Pro 也是植物应对渗透胁迫的一种重要的调节物质。本研究发现, 种子引发可显著提高干旱胁迫下高粱芽内 Pro 含量。积累的 Pro 除了作为植物细胞质内渗透调节物质外, 还在稳定生物大分子结构、降低细胞酸性、解除氨毒以及作为能量库调节细胞氧化还原等方面起着重要作用^[31]。种子引发引起 Pro 增加也是高粱种子对干旱胁迫的一种重要适应机制。

4 结论

萌发期干旱胁迫显著降低高粱种子发芽率, 抑

制种子胚芽和胚根的伸长。种子引发可显著提高高粱种子在干旱胁迫下的萌发率, 促进种子萌发, 其中 $CaCl_2$ 和 SA 引发效果较好。其主要原因可能是由于种子引发提高了胚芽内抗氧化酶活性, 减轻了膜脂过氧化对胚芽的损伤; 同时种子引发促进了胚芽内糖的代谢, 提高了 Pro 含量, 缓解了干旱胁迫对种子萌发的抑制效应。

参考文献

- [1] Ahluwalia O, Singh P C, Bhatia R. A review on drought stress in plants: implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. *Resources, Environment and Sustainability*, 2021, 5: 100032.
- [2] 张晗, 王建成, 王东建, 等. 中国高粱地方品种遗传多样性评价及中、外高粱遗传变异水平比较. *作物学报*, 2011, 37(2): 224-234.
- [3] Arouna N, Gabriele M, Pucci L. The impact of germination on sorghum nutraceutical properties. *Foods*, 2020, 9: 1218.
- [4] Khoddami A, Messina V, Vadabali Venkata K, et al. Sorghum in foods: functionality and potential in innovative products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021: 1-17.
- [5] Chadalavada K, Kumari B D R, Kumar T S. Sorghum mitigates climate variability and change on crop yield and quality. *Planta*, 2021, 253: 113.
- [6] 李文晓, 张岁岐, 山仑. 水分胁迫下紫花苜蓿和高粱种子萌发特性及幼苗耐旱性. *生态学报*, 2009, 29(6): 3066-3074.
- [7] 吴奇, 周宇飞, 高悦, 等. 不同高粱品种萌发期抗旱性筛选与鉴定. *作物学报*, 2016, 42(8): 1233-1246.
- [8] Heydecker W. Germination of an idea: the priming of seeds. University of Nottingham School of Agriculture Report, 1974: 50-67.
- [9] Wang W, Peng S, Chen Q, et al. Effects of pre-sowing seed treatments on establishment of dry direct-seeded early rice under chilling stress. *AoB Plants*, 2016, 8: plw074.
- [10] Marthandan V, Geetha R, Kumutha K, et al. Seed priming: a feasible strategy to enhance drought tolerance in crop plants. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21: 8258.
- [11] Patane C, Saita A, Tubeileh A, et al. Modeling seed germination of unprimed and primed seeds of sweet sorghum under PEG-induced water stress through the hydrotime analysis. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38: 115.
- [12] Bismillah K M, Hussain M, Raza A, et al. Seed priming with $CaCl_2$ and ridge planting for improved drought resistance in maize. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 2015, 39(2): 193-203.
- [13] Jisha K C, Vijayakumari K, Puthur J T. Seed priming for abiotic stress tolerance: an overview. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(5): 1381-1396.
- [14] 郝西, 崔亚男, 张俊, 等. 过氧化氢浸种对花生种子发芽及生理代谢的影响. *作物学报*, 2021, 47(9): 1834-1840.
- [15] Chen X F, Zhang R D, Xing Y F, et al. The efficacy of different seed priming agents for promoting sorghum germination under salt stress. *PLoS ONE*, 2021, 16(1): e0245505.
- [16] Gong H, Zhu X, Chen K, et al. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 2005, 169(2): 313-321.

- [17] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [18] 张宪政. 作物生理研究法. 北京: 农业出版社, 1992.
- [19] Zhang R D, Zhou Y F, Yue Z X, et al. Changes in photosynthesis, chloroplast ultrastructure, and antioxidant metabolism in leaves of sorghum under waterlogging stress. *Photosynthetica*, 2019, 57(4): 1076-1083.
- [20] Nezhadahmadi A, Prodhan Z H, Faruq G. Drought tolerance in wheat. *The Scientific World Journal*, 2013: 610721.
- [21] Rhaman M S, Imran S, Rauf F, et al. Seed priming with phytohormones: an effective approach for the mitigation of abiotic stress. *Plants-Basel*, 2021, 10(1): 37.
- [22] del Río L A. ROS and RNS in plant physiology: an overview. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(10): 2827-2837.
- [23] Mhamdi A, Van Breusegem F. Reactive oxygen species in plant development. *Development*, 2018, 145(15): dev164376.
- [24] Bai Y, Xiao S, Zhang Z, et al. Melatonin improves the germination rate of cotton seeds under drought stress by opening pores in the seed coat. *PeerJ*, 2020, 8: e9450.
- [25] Li C, Tan D X, Liang D, et al. Melatonin mediates the regulation of ABA metabolism, free-radical scavenging, and stomatal behaviour in two *Malus* species under drought stress. *Journal of Experimental Botany*, 2015, 66(3): 669-680.
- [26] Sohag A, Tahjib-Ul-Arif M, Brestic M, et al. Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. *Plant, Soil and Environment*, 2020, 66(1): 7-13.
- [27] Kanto U, Jutamane K, Osotsapar Y, et al. Promotive effect of priming with 5-aminolevulinic acid on seed germination capacity, seedling growth and antioxidant enzyme activity in rice subjected to accelerated ageing treatment. *Plant Production Science*, 2015, 18(4): 443-454.
- [28] Farhoudi R, Saeedipour S, MohamMadreza D. The effect of NaCl seed priming on salt tolerance, antioxidant enzyme activity, proline and carbohydrate accumulation of muskmelon (*Cucumis melo* L.) under saline condition. *African Journal of Agricultural Research*, 2011, 6(6): 1363-1370.
- [29] Rosa M, Prado C, Podazza G, et al. Soluble sugars--metabolism, sensing and abiotic stress: a complex network in the life of plants. *Plant Signal Behavior*, 2009, 4(5): 388-393.
- [30] Khan M N, Li Y, Khan Z, et al. Nanoceria seed priming enhanced salt tolerance in rapeseed through modulating ROS homeostasis and α -amylase activities. *Journal of Nanobiotechnology*, 2021, 19: 276.
- [31] Baier M, Bittner A, Prescher A, et al. Preparing plants for improved cold tolerance by priming. *Plant Cell and Environment*, 2018, 42: 782-800.

Effects of Seed Priming on Germination and Physiological Characteristics of Sorghum Seeds under Drought Stress

Zhang Ruidong, Liang Xiaohong, Liu Jing, Nan Huailin, Wang Songyu, Cao Xiong

(Institute of Industrial Crops, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract Drought stress during germination period is an obstacle limiting sorghum production. Seed priming is an efficient and easy method to regulate plant tolerance against different abiotic stresses. A germination experiment was conducted to examine the different agent priming on germination and physiological parameters of sorghum under normal and drought stress conditions. We quantified the effects of priming with polyethylene glycol (PEG), potassium chloride (KCl), calcium chloride (CaCl_2), salicylic acid (SA) and no priming (NP) under normal and drought stress conditions. The results showed that drought stress significantly reduced the germination rate and inhibited the growth of germ and radicle. The germination rates of Jinza 22 with priming by PEG, KCl, CaCl_2 and SA were increased by 18.18%, 12.72%, 35.45% and 31.82% compared with NP treatment, respectively. The germination rate of Jinzao 5564 were increased by 20.18%, 10.76%, 26.91% and 30.04% compared with NP treatment, respectively. Under drought stress, priming treatment promoted shoot and root elongation. After CaCl_2 and SA treatment, the shoot length of Jinza 22 increased by 267.07% and 271.95%, respectively, and the root length were increased by 231.94% and 355.56%, respectively. The shoot length and root length of Jinzao 5564 increased by 195.96% and 206.60%, respectively, compared with NP after CaCl_2 treatment. Seed priming increased the activities of antioxidant enzymes and alleviated the damage of membrane lipid peroxidation to the germ. At the same time, seed priming promoted the metabolism of sugar and increased the content of proline to alleviate the inhibitory effect of drought stress.

Key words Sorghum; Germination period; Drought stress; Seed priming; Physiological characteristics